doi:10.13866/j.azr.2019.01.27

柯西河流域干旱对作物产量的影响及其空间差异①

朱 冉[1,2]， 方一平[1,3]

（1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所，四川 成都 610041；
2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 中国科学院大学资源与环境学院，北京 100049）

摘 要： 干旱是柯西河流域中山区发生最为频繁的气象灾害之一，对农业生产造成极大的影响。利用气象、农业数据，结合线性趋势、回归分析等方法，分析了1998—2015年研究区的干旱变化特征及其对作物单产增长率的影响。结果表明：① 研究区作物缺水指数呈先上升后下降的趋势，就作物缺水程度来看，南部干旱灾害最为严重，中部其次，北部最轻；② 干旱对不同作物产量的影响差异显著。当 $0.60 \leq CWSI$（作物缺水指数）< 0.63 时，小麦单产增长率受到干旱的影响；当 $0.63 \leq CWSI < 0.64$ 时，马铃薯和小麦受到干旱影响；当 $0.64 \leq CWSI < 0.65$ 时，大麦、马铃薯和小麦受到干旱影响；当 $0.65 \leq CWSI < 0.66$ 时，玉米、大麦、马铃薯和小麦受到干旱影响；当 $CWSI \geq 0.66$ 时，玉米、大麦、马铃薯、小麦和水稻等5种作物均受到干旱影响；③ 干旱对作物产量的影响存在显著的区域差异，不同地区的作物受干旱影响的临界值和程度不同。

关键词： 干旱；作物产量；作物缺水指数（CWSI）；空间差异；中山区；柯西河流域

全球尤其是热带和亚热带地区，干旱发生的频率、空间范围和持续时间未来将会呈增加趋势[1-3]。农业对干旱非常敏感，是受干旱影响最大的产业之一[4-6]。水分不足是干旱区作物生长的主要限制因素[7]。研究显示，贫困农业人口受干旱的影响最为严峻[8]。以气候变暖为特征的全球气候变化对人类社会的影响不断成为各界关注的焦点，尤其是对农业生产的影响，其中对粮食产量、品质及安全性的影响已上升到关乎一个地区或国家稳定发展的高度[9-10]。目前，国际上许多学者的关注点已经从侧重于农业干旱监测指标的构建转向干旱对农作物影响研究。国外农业干旱监测指标研究主要是基于不同指数评估农业干旱程度，学者的主要观点是根据不同的研究区域选取适合该区域的干旱指标和方法[11-13]。目前常用于农业的干旱指标主要有帕尔默干旱指数（PDSI）、帕尔默Z指数、作物缺水指数（CWSI）、标准化降水指数（SPI）和标准降水蒸散指数（SPEI）等。总结干旱对农作物影响研究的成果，主要有两种观点：① 干旱对农业的负面作用。干旱通过影响作物的理化性质，导致水稻、玉米和大豆等作物有不同程度的减产，品种的改善、农业技术和管理的变化等有利于减少作物产量损失[14-17]。② 干旱对农业的正面作用。干旱导致的农作物价格波动可以使农村居民获利[18]。国内学者主要侧重于探索干旱对作物产量的影响程度，通过建立产量损失模型对其未来的农业风险进行预估[19-21]。目前，国内外学者多着眼于干旱对多种作物产量的影响差异，关于不同作物产量受干旱作用的空间差异方面的研究还相对较少[22-27]。

位于喜马拉雅山南坡的尼泊尔是一个典型的农业国家，当地居民高度依赖农业，水利设施严重缺乏，以雨养农业为主。本文以柯西河流域中山区主要的粮食作物和经济作物为研究对象，以干旱作为灾害变量，构建了作物单产增长率受干旱影响的模型，并以柯西河流域中山区为实证研究对象，旨在探究干旱对作物单产增长率的影响及其空间差异，对于当地居民适应气候变化和保障其粮食安全有十分重要的意义。

1 研究区概况

柯西河流域中山区的地理位置85°1′~88°8′E，

---

① **收稿日期：** 2018-06-04； **修订日期：** 2018-08-21
基金项目： 国家自然科学基金项目“变化环境下柯西河跨境流域农村居民生计适应链研究”（41661144038）资助
作者简介： 朱冉（1994-），女，硕士研究生，主要从事气候变化适应方面的研究. E-mail：zhuran0520@foxmail.com
通讯作者： 方一平. E-mail：ypfang@imde.ac.cn

26°20′~28°11′N，由尼泊尔境内的27个县组成。研究区面积约3.95×10⁴ km²，家庭总户数约3.00×10⁶户，人口1.30×10⁷。年平均气温为10.5 ℃[28]，年内降水分配不均匀。全境气候垂直变化非常大，垂直自然带完整，从高到低依次分布着喜马拉雅山过渡带（>5 000 m）、高山带（4 000~5 000 m）、亚高山带（3 000~4 000 m）、温带（2 100~3 000 m）、亚热带（1 000~2 100 m）、热带（<1 000 m）[29]。主要土地类型从森林、灌丛、草原、草甸、稀疏植被、裸岩依次过渡到冰川。研究区处于"第三极"的南缘，海拔跨度由北部8 431 m的喜马拉雅山向南递减至57 m的谷底，落差很大。山地面积占70%以上，生态系统敏感性强、抗干扰能力弱。研究区耕地坡度大，不利于农业生产。遥感解译表明，区域内耕地以坡耕地为主，耕地的平均坡度为24.46°，耕地的这种空间格局导致其更容易遭受干旱和山洪灾害的威胁。研究区产业结构单一，农业占比较高，经济发展水平落后，居民生活水平低下，贫困面积广，贫困发生率高达36.9%。

2 数据与方法

2.1 研究方法

通过线性趋势法分析研究区作物缺水指数的年际、年内变化趋势，并构建影响测度模型，分析作物缺水指数对不同作物单产增长率的影响差异。

2.1.1 作物缺水指数 用作物缺水指数（CWSI）表示干旱程度。CWSI根据水分平衡原理，从考虑土壤水分和农田蒸散出发来监测干旱，可直观反映农作物受水分胁迫的程度，是干旱风险评价的关键因子。基于遥感的作物缺水指数（CWSI）计算公式为：

$$CWSI = 1 - ET/PET \quad (1)$$

式中：CWSI为作物缺水指数；ET为实际蒸散量；PET为潜在蒸散量。

按CWSI划分的旱情指标的标准为：CWSI>0.913为重旱；0.912~0.765为中旱；0.764~0.617为轻旱；0.616~0.322为正常；CWSI<0.321为湿润[30]。

2.1.2 影响测度模型

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad (2)$$

$$y = ax^2 + bx + c + \varepsilon \quad (3)$$

式中：y为某种作物单位产量增长率；x为作物缺水指数；β_0和β_1分别表示一元线性回归模型的回归常数和回归系数；a、b和c分别表示非线性回归模型的二次项回归系数、一次项回归系数和回归常数；ε称为随机误差，是一个随机变量。

2.2 数据来源

利用MODIS蒸散量产品（MOD16A3）计算得到作物缺水指数（CWSI），然后利用TM影像解译得到的2010、2015年土地利用图，提取出耕地范围的作物缺水指数（CWSI）。作物产量和播种面积数据主要来源于2005—2015年的尼泊尔统计年鉴。

3 评估模型及其检验

3.1 作物单位产量增长率评估模型及其检验

研究区种植的粮食作物主要包括水稻、小麦、玉米、小米和大麦，经济作物主要包括甘蔗、油籽、烟草和马铃薯。以干旱指数为自变量，研究区作物单位产量增长率为因变量。将1998—2015年的9种作物单位产量增长率分别与该时段的干旱指数进行回归分析，得到干旱影响下作物单位产量增长率评估模型（表1）。水稻、小麦、玉米、大麦和马铃薯等5种作物的单位产量增长率与干旱指数的模型通过了显著性检验，其中小麦、玉米、大麦和马铃薯的模型通过了信度为0.05以上的F检验，水稻的模型通过了信度为0.1以上的F检验，说明5个模型的拟合优度良好。

3.2 不同区域作物单位产量增长率评估模型及其检验

将研究区划分为北部、中部和南部地区。其中，北部地区平均海拔最高，以山地居多；中部地区海拔其次，多丘陵；南部地区海拔最低，以平原为主。将

表1 干旱影响下作物单位产量增长率评估模型

Tab.1 Evaluation models of the crop yield growth rate per unit area under drought

作物名称	模型	R^2	F检验水平
水稻	$y_1 = -20.110x^2 + 26.529x - 8.723$	0.339*	0.045
小麦	$y_2 = -18.958x^2 + 22.767x - 6.733$	0.521**	0.006
玉米	$y_3 = -138.455x^2 + 179.414x - 58.023$	0.323**	0.022
大麦	$y_4 = -47.844x^2 + 60.927x - 19.354$	0.536**	0.007
马铃薯	$y_5 = -14.647x^2 + 18.335x - 5.690$	0.346**	0.047

注：x表示干旱指数，y_1、y_2、y_3、y_4、y_5分别表示水稻、小麦、玉米、大麦和马铃薯的单位产量增长率。*表示在0.1水平上显著，**表示在0.05水平上显著。

表 2 干旱影响下不同区域作物单位产量增长率评估模型

Tab. 2 Evaluation models of the crop yield growth rate per unit area in different regions under drought

	北部地区		中部地区		南部地区	
	模型	R^2	模型	R^2	模型	R^2
水稻	–	–	$y_{12}=-36.77x_2^2+46.94x_2-14.94$	0.07 *	$y_{13}=-66.96x_3^2+98.66x_3-36.28$	0.32 *
小麦	$y_{21}=-3.61x_1+2.07$	0.33 **	$y_{22}=-14.89x_2^2+17.24x_2-4.91$	0.43 **	$y_{23}=-10.27x_3^2+14.37x_3-4.96$	0.28 *
大麦	$y_{31}=-69.27x_1^2+79.24x_1-22.57$	0.33 ***	$y_{32}=-32.41x_2^2+38.54x_2-11.37$	0.35 *	$y_{33}=-62.64x_3^2+94.11x_3-35.28$	0.29 **
马铃薯	$y_{41}=0.31x_1-0.15$	0.33 **	$y_{42}=-36.79x_2^2+45.98x_2-14.31$	0.28 *	$y_{43}=-0.29x_3+0.23$	0.31 **

注:x_1、x_2、x_3 分别表示北部、中部和南部地区的作物缺水指数,y_1、y_2、y_3、y_4 分别表示水稻、小麦、大麦和马铃薯的单位产量增长率。* 表示在 0.1 水平上显著,** 表示在 0.05 水平上显著,*** 表示在 0.01 水平上显著。

不同区域的作物单位产量增长率分别与该区域的干旱指数进行回归分析,得到北部、中部和南部地区干旱对不同作物单产增长率影响的模型结果(表 2)。北部地区小麦、玉米和马铃薯的模型通过了信度为 0.05 以上的 F 检验,大麦通过了信度为 0.01 以上的 F 检验;中部地区水稻、大麦和马铃薯通过了信度为 0.1 以上的 F 检验,小麦和玉米通过了信度为 0.05 以上的 F 检验;南部地区水稻和小麦通过了信度为 0.1 以上的 F 检验,大麦和马铃薯通过了信度为 0.05 以上的 F 检验,说明各模型拟合优度良好。

4 影响及其差异分析

4.1 干旱时空差异

4.1.1 干旱时间变化特征 从作物缺水指数年际变化来看,研究区作物缺水指数具有阶段性特征,呈现出先上升后下降的趋势。1998—2009 年作物缺水指数逐渐上升,2009 年之后逐渐下降。1998—2015 年期间,研究区作物缺水指数在 0.63 ~ 0.71 之间浮动,由于 0.62 ~ 0.76 为轻旱,所以全部年份皆处于轻度干旱状态(图 1)。

从作物缺水指数的月变化来看,3—7 月作物缺水指数大幅度减小,7—12 月以较大速率增加,而 12 月至翌年 3 月则缓慢增加。由图 2 可以看出,6 月、7 月、8 月、9 月和 10 月是作物缺水指数最小的时段,1—4 月和 12 月平均作物缺水指数为 0.81,根据旱情等级指标,达到中等干旱等级。5 月和 11 月平均作物缺水指数为 0.65,根据划分等级,属于轻度干旱状况。

4.1.2 干旱空间分布特征 从空间上来看,研究区作物缺水指数由北至南总体呈逐渐增加的趋势。南部特莱平原干旱最为严重、中山区其次、北部喜马拉雅山区最轻(图 3)。研究区南部的几个县作物缺水指数平均为 0.77 左右,包括:Sarlahi、Dhanusa、Siraha、Rautahat、Mahottari、Saptari、Sunsari;北部 5 个县作物缺水程度较低,平均为 0.55,包括:Sindhupalc、Sankhuwas、Dolakha、Solukhumbu 和 Taplejung。中部的几个县作物缺水程度中等,平均为 0.64。

4.2 作物播种面积和产量的年际差异

4.2.1 粮食作物播种面积和产量 研究区种植的粮食作物种类主要包括水稻、小麦、玉米、小米和大

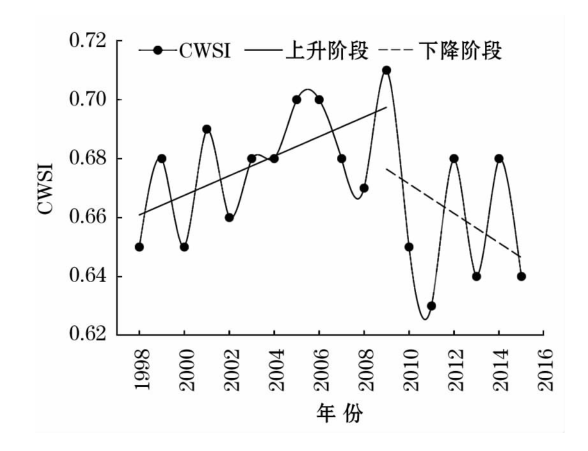
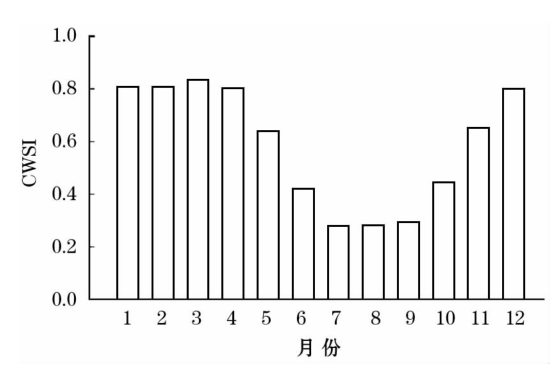


图 1 1998—2015 年柯西河流域中山区作物缺水指数

Fig. 1 The CWSI in the mid-mountain of the Koshi Basin during the period from 1998 to 2015



注:数据为 1998—2015 年多年作物缺水指数的月平均值。

图 2 柯西河流域中山区作物缺水指数月变化

Fig. 2 The CWSI in the mid-mountain of the Koshi Basin during the period from January to December

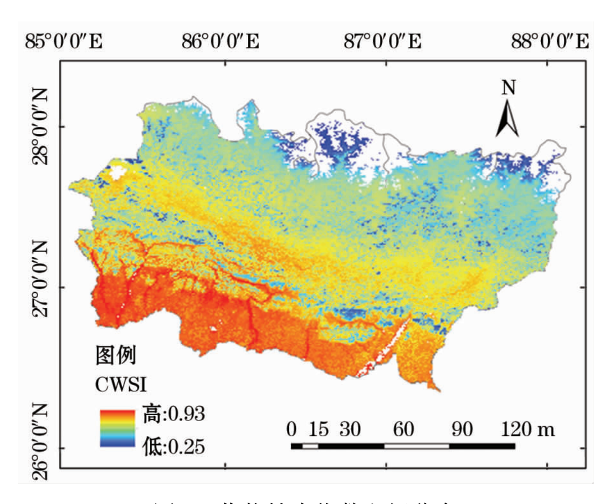


图 3 作物缺水指数空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of CWSI

麦。1998—2015 年,研究区粮食作物播种面积呈波动下降趋势,平均每年减少 3 388 hm^2。其中,小麦、玉米和小米播种面积呈上升趋势,水稻和大麦播种面积呈下降趋势。水稻平均每年减少 8 174 hm^2,大麦平均每年减少 101 hm^2,水稻播种面积减少速率最快。粮食作物总产量呈上升趋势,平均每年增加 46 023 t。其中,水稻和大麦产量呈下降趋势,小麦、玉米和小米的产量呈上升趋势。小麦产量平均每年增加 18 185 t,玉米产量平均每年增加 30 313 t,小米产量平均每年增加 361 t,玉米产量增加速率最快(图 4)。

4.2.2 经济作物播种面积和产量 研究区种植的经济作物种类包括甘蔗、油籽、烟草和马铃薯。1998—2015 年,研究区经济作物播种面积和总产量呈直线上升趋势,播种面积平均每年增加 5 982 hm^2,总产量平均每年增加 160 794 t。经济作物播种面积的增加主要是由于甘蔗、油籽和马铃薯播种面积的增加。其中,甘蔗播种面积平均每年增加 1 339 hm^2,油籽播种面积平均每年增加 1 678 hm^2,马铃薯播种面积平均每年增加 3 137 hm^2,马铃薯播种面积增加速率最快。烟草播种面积呈下降趋势,平均每年减少 171 hm^2。经济作物总产量增加同样是由于甘蔗、油籽和马铃薯产量的增加。其中甘蔗产量平均每年增加 98 833 t,油籽产量平均每年增加 2 031 t,马铃薯产量平均每年增加 60 093 t,甘蔗产量增加速率最快。烟草产量呈下降趋势,平均每年减少 162 t。1999 年经济作物总产量明显降低,主要是由于研究区各地该年甘蔗产量大幅度减少(图 5)。

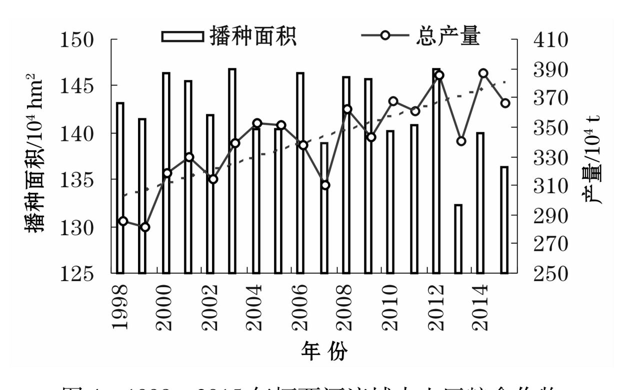


图 4 1998—2015 年柯西河流域中山区粮食作物播种面积与产量

Fig. 4 The sown area and crop yield in the mid-mountain of the Koshi Basin during the period from 1998 to 2015

4.3 影响差异及其原因

4.3.1 干旱对作物产量的影响差异及其原因 从研究区整体来看,水稻、小麦、玉米、大麦和马铃薯的单产增长率和干旱指数均通过了检验。不同作物对水分的需求不同,所以,干旱对不同作物的影响存在明显差异。当 0.60≤CWSI<0.63 时,小麦单产增长率受到干旱的影响;当 0.63≤CWSI<0.64 时,马铃薯和小麦受干旱影响;当 0.64≤CWSI<0.65 时,大麦、马铃薯和小麦受干旱影响;当 0.65≤CWSI<0.66 时,玉米、大麦、马铃薯和小麦受干旱影响;当 CWSI≥0.66 时,玉米、大麦、马铃薯、小麦和水稻均受到干旱影响。从表 1 可以看出,当作物缺水指数超过相应作物的临界值后,每增加一个单位的作物缺水指数,玉米产量受到的影响最大,其次是大麦、水稻和小麦,受影响最小的是马铃薯。这说明临界值与影响程度之间不存在正比或反比的关系。小米、甘蔗、烟草和油籽单产增长率与作物缺水指数的

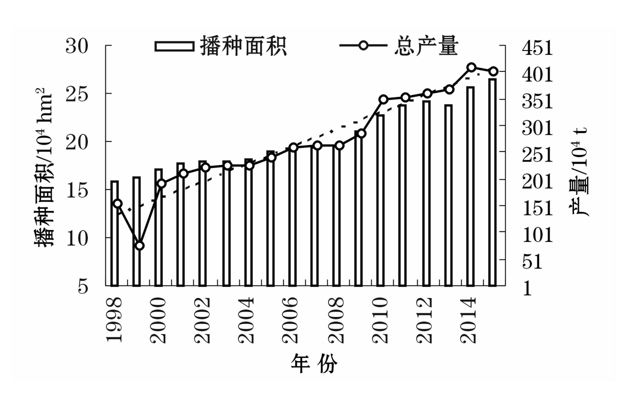


图 5 1998—2015 年柯西河流域中山区经济作物播种面积与产量

Fig. 5 The sown area and yields of cash crops in the mid-mountain of the Koshi Basin during the period from 1998 to 2015

回归模型未通过显著性检验。分别将这 4 种作物的单产增长率与作物缺水指数进行相关性分析,发现相关性均不显著。

4.3.2　干旱对作物产量影响的区域差异　北部地区干旱对作物产量的影响主要体现在小麦、大麦和马铃薯上。水稻和玉米不受作物缺水指数变化的影响,其可能的原因是水稻和玉米受影响的临界值较高,而中山区作物缺水指数整体较低,并未达到该临界值。小麦单产增长率与作物缺水指数呈线性关系,影响系数为 -3.61。当 CWSI≥0.57 时,大麦受到干旱影响。马铃薯单产增长率与作物缺水指数呈线性关系,可能原因是作物缺水指数没有达到马铃薯的临界值。研究表明,苗期适度的水分亏缺并不会降低整株的物质积累量,反而利于马铃薯合理的物质分配,通过把更大比例的干物质转移到地下用于块茎的形成和膨大,从而达到结薯数和块茎重量增加的效果,形成增产效应[31-32]。这也是当 0.51≤CWSI<0.64 时,北部地区马铃薯单产增长率随作物缺水指数增加而增加的原因。

中部地区干旱对作物产量的影响主要体现在水稻、小麦、大麦和马铃薯上。当 0.58≤CWSI<0.62 时,小麦单产增长率受到干旱的影响;当 0.62≤CWSI<0.64 时,大麦、马铃薯和小麦受到干旱影响;当 CWSI≥0.64 时,水稻、大麦、马铃薯和小麦均受到干旱影响。玉米与作物的缺水指数回归模型未通过显著性检验,根据表 1 中干旱影响下玉米单位产量增长率评估模型可以推测,未通过检验的原因可能是玉米受作物缺水指数影响的临界值较高,而中部地区缺水程度不高,其大多数年份作物缺水指数未达到玉米的临界值,因此,中部地区玉米单产增长率和作物缺水指数并未呈现出明显的线性或非线性关系。

南部地区干旱对作物产量的影响主要体现在水稻、小麦、大麦和马铃薯上。水稻、小麦和大麦单产增长率与作物缺水指数呈非线性关系,当 0.70≤CWSI<0.74 时,小麦单产增长率受到干旱的影响;当 0.74≤CWSI<0.75 时,水稻和小麦受到干旱影响;当 CWSI≥0.75 时,大麦、水稻和小麦均受到干旱影响。玉米与作物缺水指数关系模型未通过检验。马铃薯单产增长率与作物缺水指数呈线性关系,影响系数为 -0.29。随着作物缺水指数的增加,马铃薯单产增长率直线下降,说明马铃薯受干旱影响的临界值低于 0.70。

干旱对作物产量的影响存在显著的区域差异,不同地区的作物受干旱影响的临界值和程度不同。除水分因素外,干旱对作物产量的影响出现区域差异的可能原因:一是不同区域的土壤质地存在差异,土壤质地在干旱对作物产量影响中是重要的协变因素[33]。二是不同区域温度不同,而在土壤水分不足的情况下,温度升高可能会对作物生长造成更大的破坏[34]。三是区域之间坡度差异大,坡耕地主要分布在北部和中部地区,北部地区耕地平均坡度大于中部地区,坡耕地土壤含水量较差,更易受干旱灾害威胁。南部平原地区作物受干旱影响的临界值高于北部和中部地区,坡度是重要的影响因素之一。四是不同地区种植的作物品种存在差异,南部地区种植的作物品种多耐旱,这也是其作物受干旱影响的临界值高于北部和中部地区的原因之一[33]。五是不同区域的灌溉条件不同,北部地区灌溉设施拥有率低于中部地区,而中部地区的灌溉条件不如南部地区,这也是不同区域的作物受干旱影响的临界值和程度存在差异的重要原因。

5　结 论

(1) 1998—2015 年柯西河流域中山区的作物缺水指数具有阶段性特征,呈现出先上升后下降的趋势。根据干旱等级划分,全部年份皆处于轻度干旱状态。就作物缺水程度来看,研究区南部干旱灾害最为严重,中部其次,北部最轻。

(2) 1998—2015 年,研究区粮食作物播种面积呈波动下降趋势,其中小麦、玉米和小米播种面积上升,水稻和大麦播种面积下降。粮食作物总产量呈上升趋势,其中水稻和大麦产量下降,小麦、玉米和小米产量上升。经济作物播种面积和总产量均呈直线上升趋势,其中甘蔗、油籽和马铃薯播种面积和产量上升,烟草播种面积和产量下降。

(3) 干旱对不同作物产量的影响存在明显差异。当 0.60≤CWSI<0.63 时,小麦单产增长率受到干旱的影响;当 0.63≤CWSI<0.64 时,马铃薯和小麦受干旱影响;当 0.64≤CWSI<0.65 时,大麦、马铃薯和小麦受干旱影响;当 0.65≤CWSI<0.66 时,玉米、大麦、马铃薯和小麦受干旱影响;当 CWSI≥0.66 时,玉米、大麦、马铃薯、小麦和水稻受干旱影响。

(4) 干旱对作物产量的影响存在显著的区域差异,不同地区的作物受干旱影响的临界值和程度不

同。南部地区水稻受干旱影响的临界值和程度均高于中部;南部小麦受干旱影响的临界值高于中部,但中部干旱对小麦的影响程度大于南部,北部地区小麦单产增长率与作物缺水指数呈线性关系;南部地区大麦受干旱影响的临界值最大,中部其次,北部最小,北部地区受影响程度最高,南部其次,中部最低;北部和南部地区马铃薯单产增长率与作物缺水指数呈线性关系,中部呈非线性关系。

参考文献(References):

[1] Dore M H. Climate change and changes in global precipitation patterns: What do we know? [J]. Environment International, 2005, 31(8): 1 167 – 1 181.

[2] Dai A. Increasing drought under global warming in observations and models[J]. Nature Climate Change, 2013, 3(1): 52 – 58.

[3] Touma D, Ashfaq M, Nayak M A, et al. A multi-model and multi-index evaluation of drought characteristics in the 21st century[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 196 – 207.

[4] 杨晓光, 刘志娟, 陈阜. 全球气候变暖对中国种植制度可能影响 I. 气候变暖对中国种植制度北界和粮食产量可能影响的分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(2): 329 – 336. [Yang Xiaoguang, Liu Zhijuan, Chen Fu. The possible effects of global warming on cropping systems in China I. The possible effects of climate warming on northern limits of cropping systems and crop yields in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(2): 329 – 336.]

[5] Wang J, Mendelsohn R, Dinar A, et al. The impact of climate change on China's agriculture[J]. Agricultural Economics, 2009, 40: 323 – 337.

[6] 林而达, 吴绍洪, 戴晓苏, 等. 气候变化影响的最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 125 – 131. [Lin Erda, Wu Shaohong, Dai Xiaosu, et al. Update understanding of climate change impacts[J]. Advances in Climate Change Research, 2007, 3(3): 125 – 131.]

[7] 郑艺, 张丽, 周宇, 等. 1982—2012 年全球干旱区植被变化及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(1): 59 – 66. [Zheng Yi, Zhang Li, Zhou Yu, et al. Vegetation change and its driving factors in global dry lands during the period of 1982 – 2012[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(1): 59 – 66.]

[8] 赵雪雁. 地理学视角的可持续生计研究:现状、问题与领域[J]. 地理研究, 2017, 36(10): 1 859 – 1 872. [Zhao Xueyan. Sustainable livelihoods research from the perspective of geography: The present status, questions and priority areas[J]. Geographical Research, 2017, 36(10): 1 859 – 1 872.]

[9] 秦大河, Thomas Stocker, 259 名作者和 TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1 – 6. [Qin Dahe, Thomas Stocker, 259 author and TSU (in Bern and Beijing). The highlights conclusions of the first working group of the fifth assessment report of IPCC[J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis, 2014, 10(1): 1 – 6.]

[10] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874 – 883. [Qin Dahe. Science of climate change and sustainable development of human beings[J]. Progress in Geography, 2014, 33(7): 874 – 883.]

[11] Tian L, Yuan S, Quiring S M. Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-central United States[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2018, 249: 107 – 119.

[12] Sánchez N, González-Zamora Á, Martínez-Fernández J, et al. Integrated remote sensing approach to global agricultural drought monitoring[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 141 – 153.

[13] Zhao H, Xu Z, Zhao J, et al. A drought rarity and evapotranspiration-based index as a suitable agricultural drought indicator[J]. Ecological Indicators, 2017, 82: 530 – 538.

[14] Dubey A, Kumar A, Abd_Allah E F, et al. Growing more with less: Breeding and developing drought resilient soybean to improve food security[J]. Ecological Indicators, 2018.

[15] Zhang J, Campana P E, Yao T, et al. The water-food-energy nexus optimization approach to combat agricultural drought: A case study in the United States[J]. Applied Energy, 2018, 227: 449 – 464.

[16] Kim T H, Hur Y J, Han S I, et al. Drought-tolerant QTL qVDT11 leads to stable tiller formation under drought stress conditions in rice[J]. Plant Science, 2016, 256: 131 – 138.

[17] Elliott J, Glotter M, Ruane A C, et al. Characterizing agricultural impacts of recent large-scale US droughts and changing technology and management[J]. Agricultural Systems, 2018, 159: 275 – 281.

[18] Musolino D A, Massarutto A, Carli A D. Does drought always cause economic losses in agriculture? An empirical investigation on the distributive effects of drought events in some areas of Southern Europe[J]. Science of the Total Environment, 2018, 633: 1 560 – 1 570.

[19] 段素梅, 杨安中, 黄义德, 等. 干旱胁迫对水稻生长、生理特性和产量的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(6): 1 124 – 1 132. [Duan Sumei, Yang Anzhong, Huang Yide, et al. Effects of drought stress on growth and physiological feature and yield of various rice varieties[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(6): 1 124 – 1 132.]

[20] 何永坤, 唐余学, 张建平. 中国西南地区干旱对玉米产量影响评估方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 185 – 191. [He Yongkun, Tang Yuxue, Zhang Jianping. Evaluation method for effects of drought disaster on yields of maize in Southwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(23): 185 – 191.]

[21] 颜亮东, 李林, 李红梅. 青海省气象干旱对粮食产量的影响及其评估方法研究[J]. 冰川冻土, 2013, 35(3): 687 – 691. [Yan Liangdong, Li Lin, Li Hongmei. The impact of drought on grain output in Qinghai province and how to assess[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(3): 687 – 691.]

[22] 董朝阳, 刘志娟, 杨晓光. 北方地区不同等级干旱对春玉米产量影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 157 – 164. [Dong Chaoyang, Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang. Effects of different grade drought on grain yield of spring maize in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(11): 157 – 164.]

[23] 徐建文, 居辉, 梅旭荣, 等. 近 30 年黄淮海平原干旱对冬小麦产量的潜在影响模拟[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 150 –

158.〔Xu Jianwen, Ju Hui, Mei Xurong, et al. Simulation on potential effects of drought on winter wheat in Huang-Huai-Hai Plain from 1981 to 2010〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6):150 – 158.〕

〔24〕段骅，唐琪，剧成欣，等. 抽穗灌浆早期高温与干旱对不同水稻品种产量和品质的影响〔J〕. 中国农业科学，2012，45(22)：4 561 – 4 573.〔Duan Ye, Tang Qi, Ju Chengxin, et al. Effect of high temperature and drought on grain yield and quality of different rice varieties during heading and early grain filling periods〔J〕. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(22):4 561 – 4 573.〕

〔25〕Masupha T E, Moeletsi M E. Analysis of potential future droughts limiting maize production, in the Luvuvhu River catchment area, South Africa〔J〕. Physics & Chemistry of the Earth Parts A/b/c, 2018, 105:44 – 51.

〔26〕Doughty R, Xiao X, Wu X, et al. Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010 – 2016, Oklahoma, USA〔J〕. Agricultural Water Management, 2018, 204:47 – 59.

〔27〕张雪琪，满苏尔·沙比提，马国飞. 叶尔羌河平原绿洲气候变化对粮食生产的影响〔J〕. 干旱区研究，2018，35(3)：705 – 712.〔Zhang Xueqi, Mansuer Shabiti, Ma Guofei. Effects of climate change on grain production in plain oasis in the Yarkant River Basin〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(3):705 – 712.〕

〔28〕聂勇. 珠穆朗玛峰地区土地覆被变化研究〔D〕. 北京：中国科学院地理科学与资源研究所，2010.〔Nie Yong. The Research on Land Cover Change in the Everest Region〔D〕. Beijing: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, 2010.〕

〔29〕Shrestha K. Dictionary of Nepalese Plant Names〔M〕. Mandala Book Point, 1998.

〔30〕李纪人. 旱情遥感监测方法及其进展〔J〕. 水文，2001，21(4)：15 – 17.〔Li Jiren. Method and advances of drought monitoring by remote sensing〔J〕. Journal of China Hydrology, 2001, 21(4):15 – 17.〕

〔31〕贾立国，陈玉珍，樊明寿，等. 干旱对马铃薯光合特性及块茎形成的影响〔J〕. 干旱区资源与环境，2018，32(2)：188 – 193.〔Jia Liguo, Chen Yuzhen, Fan Mingshou, et al. Influence of drought stress on potato photosynthetic characteristics and tuberization and its possible mechanism〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2):188 – 193.〕

〔32〕杜太生，康绍忠. 基于水分—品质响应关系的特色经济作物节水调质高效灌溉〔J〕. 水利学报，2011，42(2)：245 – 252.〔Du Taisheng, Kang Shaozhong. Efficient water-saving irrigation theory based on the response of water and fruit quality for improving quality of economic crops〔J〕. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(2):245 – 252.〕

〔33〕Daryanto S, Wang L, Jacinthe P A. Global synthesis of drought effects on cereal, legume, tuber and root crops production: A review〔J〕. Agricultural Water Management, 2017, 179:18 – 33.

〔34〕王柳，熊伟，温小乐，等. 温度降水等气候因子变化对中国玉米产量的影响〔J〕. 农业工程学报，2014，30(21)：138 – 146.〔Wang Liu, Xiong Wei, Wen Xiaole, et al. Effect of climatic factors such as temperature, precipitation on maize production in China〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(21):138 – 146.〕

Impact of Drought on Crops Yield and Its Spatial Difference in the Mid-Mountain of the Koshi Basin

ZHU Ran[1,2],　FANG Yi-ping[1,3]

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources, Chengdu* 610041, *Sichuan, China*;　2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;
3. *College of Resources and Environment Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)

Abstract:　Drought is one of the most frequent meteorological hazards in the mid-mountain of the Koshi Basin and affects seriously the agricultural production. In this study, the meteorological and agricultural data were used to analyze the drought change and its impact on crop yield in the study area from 1998 to 2015 using the linear trend and regression analysis. The results are as follows: ① The crop water stress index (CWSI) was increased at first and then decreased. In terms of CWSI, the drought disaster in the southern area was the most serious, then in the central area, and it was the lightest in the north; ② The impacts of drought on different crops were significantly different. When $0.60 \leqslant CWSI < 0.63$, drought affected the growth rate of wheat yield per unit area. When $0.63 \leqslant CWSI < 0.64$, the yields of potato and wheat were affected by drought. When $0.64 \leqslant CWSI < 0.65$, the yields of barley, potato and wheat were affected by drought. When $0.65 \leqslant CWSI < 0.66$, the yields of corn, barley, potato and wheat were affected by drought. When $CWSI \geqslant 0.66$, the yields of corn, barley, potato, wheat and rice were affected by drought; ③ There was a significant spatial difference in the impact of drought on crop yield. The critical values and impact extents caused by drought were different from different regions.

Key words:　drought; crop yield; crop water stress index; spatial difference; the mid-mountain of the Koshi Basin